

УДК.620.179.16

DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-78-88

## ДЕФЕКТОСКОПИЯ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ АКУСТИЧЕСКИМ ВОЛНОВОДНЫМ МЕТОДОМ\*

**В. А. Стрижак**, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**А. В. Пряхин**, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**Р. Р. Хасанов**, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**С. С. Мкртчян**, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Широкому внедрению арматуры композитной полимерной мешает отсутствие производительных методик ее дефектоскопии. Особенности материала и формы сечения композитной арматуры накладывают существенные ограничения на выбор метода поиска дефектов. Предлагаемая волноводная методика контроля протяженных объектов свободна от недостатков, свойственных другим методам.*

*Представлено описание измерительной системы, реализующей волноводную методику контроля на стержнях композитной арматуры. Методика опробована на партии прутков композитной арматуры с условным диаметром 8 мм и объемом более 1100 штук от четырех производителей. В качестве измеряемого параметра используется амплитуда эхо-сигнала от дефекта, приведенная к амплитуде первого донного импульса. Показаны выявляемые дефекты и соответствующие им эхограммы. Определен браковочный уровень в 2 % от величины первого донного импульса, позволивший найти и визуально подтвердить дефектные участки, имеющие значительные отклонения от сечения прутка.*

*На основании моделирования изменения площади сечения в зоне обнаруженных дефектов рассчитан коэффициент отражения. Сравнение рассчитанного коэффициента отражения с сигналом от дефекта показывает высокую эффективность метода контроля при выявлении дефектов вне зависимости от их расположения по сечению стержня. Производительность одной установки при сплошном контроле прутков длиной 12 м составляет 33 м/с.*

**Ключевые слова:** акустический контроль, волноводный метод, дефектоскопия, арматура композитная, эхограмма.

### Введение

**Б**урное развитие рынка композитных материалов, в частности арматуры композитной полимерной (АКП) (ГОСТ 31938–2012), осложнено отсутствием эффективной системы контроля качества продукции при огромном числе мелких производителей. Невысокая величина начальных затрат при организации производства проката из композитных материалов ведет к расширению списка мелких производителей, не обремененных заботой о качестве продукции. При этом приход на рынок крупных потребителей осложняется значительными коммерческими рисками из-за отсутствия стабильных характеристик продукции и сложностью с выделением на рынке ответственного производителя. В соответствии с ГОСТ 32492 «Композитная арматура. Методы определения физико-механических характеристик» для контроля качества арматуры используют только разрушающие методы (испытание на осевое растяжение, испытание на сжатие, испытание на поперечный срез, определение прочности сцеп-

ления с бетоном, испытание на продольный изгиб). Методы требуют специализированного оборудования и характеризуются длительным сроком подготовки образцов (возраст образцов при определении прочности сцепления с бетоном 28 суток). Разработка экспресс-методов оценки качества АКП позволит, с одной стороны, сертифицировать технологии изготовления проката из композитных материалов, с другой – выделить на рынке качественную продукцию и ответственных производителей.

Препятствием при построении приборов неразрушающего контроля (НК) для композитных материалов является то, что большинство методов НК основано на взаимодействии металла с магнитными и электромагнитными полями (вихретоковый метод НК, магнитный метод НК и др.) и неприменимо к АКП. Для контроля качества аналогичных композитных материалов предложено несколько методов акустического контроля [1]. Иностранные авторы заостряют свое внимание на поиске эффективности обнаружения дефектов, локализации и идентифика-

ции дефектов на раннем этапе их развития, сложностях применения методов НК и стоимости контроля [2]. В качестве объектов используются композитные структуры из армированного стекловолокном пластика, гибридного композита с сердечником из того же материала, лицевого листов из алюминиевого сплава и армированной углепластиком пластмассовой структуры, извлеченной из вертикального стабилизатора военного самолета [3]. Лазерная шерография признается наиболее подходящим методом в сравнении с результатами визуального и ультразвукового контроля при определении отслоившихся участков материала от ударных повреждений. Активная термография с возбуждением вспышкой опробована на образцах из армированного углеродным волокном полимера (CFRP) с искусственным расслоением и ударным повреждением [4]. Для легких жестких панелей самолетов предложен метод выявления повреждений обшивки и оценки качества посредством вибрационных испытаний [5]. Также предлагается контролировать композитные материалы, применяемые в строительстве летательных аппаратов, методом эхоимпульсной ультразвуковой томографии с погружением исследуемого образца в жидкость [6]. Обнаружение повреждений и разрывов между ребрами жесткости и композитной обшивкой в аэрокосмической промышленности реализуется возбуждением и приемом волн Лэмба вдоль структуры с использованием тонких пьезоэлектрических преобразователей (активный режим) или при непрерывном мониторинге с использованием датчиков акустической эмиссии (пассивный режим) [7–9]. Разрабатываются методы неразрушающей оценки целостности структур с использованием измерений собственных частот. Предлагается высокоэнергетическая рентгеновская микротомография для распознавания и количественного определения пористости клея в момент его адгезии, образованной стекловолокном и композитом эпоксидной смолы [10], и пенетрантная рентгенография для контроля болтовых соединений в стекловолоконных композитах [11]. Анализируется использование шерографии и ее применения при неразрушающем контроле, контроль адгезии с помощью электронной микроскопии и измерения потенциала при бесконтактном возбуждении несвязанных листовых мембран. Демонстрируется чувствительность к наличию повреждений при мониторинге поведения нелинейного упругого поврежденного материала методами одноименного не-

линейно-резонансного ультразвука (NRUS) и нелинейной волновой модуляции (NWMS) [12].

Как правило, целью использования методов НК в применении к композитным материалам является контроль деталей авиационной техники на предмет локальных дефектов и повреждений [13]. Особые трудности возникают при разработке метода НК длинномерных композитных материалов (прутки, штанги, трубы, арматура и т. д.). Реализация ультразвукового прозвучивания с использованием сканирования для композитной арматуры наталкивается на особенности поверхности (ребристость, навивка, песчаное покрытие и т. д.).

Целью настоящей работы является описание оборудования и методики контроля композитной арматуры с использованием волноводного акустического метода контроля.

#### **Суть волноводного метода контроля**

Технология волноводного контроля предназначена для протяженных объектов, длина которых многократно превышает размеры поперечных сечений. Используемые типы волн (стержневая и крутильная) отличаются малой дисперсией скорости или ее отсутствием (для крутильной волны), свойственное волнам Поггаммера других типов [14]. Благодаря отсутствию потерь на расхождение указанные волны ослабляются лишь за счет затухания в материале объекта контроля [15]. При использовании в волноводном методе низких частот потери на затухание малы, что позволяет прозвучивать протяженные объекты практически без ослабления сигнала и наблюдать серию многократных отражений зондирующего импульса от дефектов и свободных торцов объекта контроля [16]. Равномерное распределение смещений по сечению объекта в стержневых волнах гарантирует одинаковую чувствительность к дефектам и свойствам материала по всей глубине и длине объекта [17–19].

Метод реализуется при помощи посылки акустических импульсов в тело композитной арматуры со стороны торца с последующей регистрацией отраженных сигналов. Достоинства волноводной методики контроля:

- не требует применения контактных и иммерсионных жидкостей, какой-либо подготовки поверхности объекта контроля;
- чувствительность к дефектам по всему сечению тела прутка;
- отсутствие необходимости сканирования;
- возможность контроля при локальном доступе к торцу объекта.

В силу отсутствия сканирования метод отличается высокой производительностью.

В соответствии с закономерностями распространения стержневой и крутильной волн отражение от дефектного участка волновода определяется изменением механического импеданса волновода  $Z = \rho CS$  ( $\rho$  – плотность,  $C$  – скорость акустической волны,  $S$  – площадь поперечного сечения). В простейшем случае при переходе от участка с механическим импедансом  $Z_1$  к участку с механическим импедансом  $Z_2$  коэффициент отражения  $R_d$  определяется формулой [20]

$$R_d = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}. \quad (1)$$

Если свойства материала волновода не меняются ( $\rho C = \text{const}$ ), а меняется лишь его сечение (поверхностные дефекты, приводящие к потере или избыточности некоторой части материала), коэффициент отражения  $R_d$  определяется по формуле

$$R_d = \frac{S_2 - S_1}{S_2 + S_1}. \quad (2)$$

Формула (2) позволяет оценить взаимодействие акустических волн с нарушениями сечения тела прутка.

#### Оборудование для реализации волноводного метода контроля

Существует оборудование для дефектоскопии протяженных металлических объектов (прутков, насосных штанг, труб), реализующее волноводные технологии акустической дефектоскопии в условиях ремонтных баз технического обслуживания насосно-глубинного оборудования, на предприятиях, выпускающих насосные штанги (НШ), и при входном контроле проката. Дефектоскоп АДНШ предназначен для сервисного обслуживания как новых, так и быв-

ших в эксплуатации НШ и прутков. Дефектоскоп АДНКТ предназначен для контроля насосно-компрессорных труб (НКТ) [21, 22].

Прозвучивание прутков АКП производится датчиком, закрепленным на торце неподвижного прутка. Упрощенная структурно-функциональная схема дефектоскопа АДНШ/АДНКТ приведена на рис. 1. Основой дефектоскопа является универсальный компьютер со специализированным программным обеспечением на базе 2-канальной платы аналогового ввода и цифровыми выходами [23, 24]. Аналоговый тракт состоит из блока генератора/усилителя (ГПУ) и блока усиления/коммутации (УКП). Дефектоскоп АДНШ использует электромагнитный излучатель и пьезоэлектрический приемник [25]. Для адаптации дефектоскопа к излучению и приему акустических импульсов через пьезоэлектрический приемник разработано переходное устройство (ПУ). Блок ГПУ содержит генератор ударного импульса до 350 В и усилительный тракт с коэффициентом усиления в зависимости от модели дефектоскопа АДНШ/АДНКТ – 1/10. Усилитель блока ГПУ реализует два независимых выхода – звено 0 и звено 1, снабженное дополнительным звеном усиления 25. Таким образом, в информационно измерительной системе дефектоскопа реализуется независимая регистрация одного сигнала в двух динамических диапазонах. Блок УКП реализует функцию согласования сигналов с платой АЦП, генерацию питающих напряжений аналогового тракта, мультиплексирования измеряемых сигналов и содержит по каждому звену усилители с фиксированной полосой частот и переключаемым коэффициентом усиления 1/25. Разделение аналогового тракта на блоки УКП и ГПУ позволило адаптироваться к значительной длине объекта контроля. Расстояние между блоками УКП и ГПУ может достигать 15 м, а в кабеле, соединяющем блоки, отсутствуют напряжения выше 20 В.

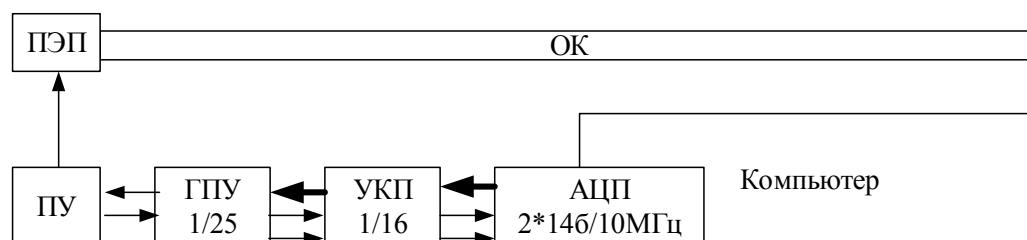


Рис. 1. Структурная схема дефектоскопа АДНШ/АДНКТ: ПЭП – пьезоэлектрический приемник; ПУ – переходное устройство; ГПУ – блок генератора и усиления; УКП – блок усиления и коммутации; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Fig. 1. Structural scheme of the defectoscope ADNS / ADNT: PE - piezoelectric receiver; PU - transient device; GPU - block of generator and amplification; UCP - block of amplification and switching; ADC is an analog-to-digital converter

Информационно-измерительная система дефектоскопа за счет аналогового тракта с двумя независимыми звеньями с переменным коэффициентом усиления 1/25 в каждом звене и шкалой чувствительности двухканальной платы АЦП (5 В, +2,5 В, 1 В, 0,5 В) позволяет оценивать соотношения амплитуд разных участков измеряемого сигнала, отличающихся в 100 и более раз. Причем звено 1 за счет дополнительного коэффициента усиления 25 позволяет транслировать слабые сигналы с датчика через

блок УКП в АЦП уже в усиленном режиме, что даже на значительном удалении датчика от компьютера обеспечивает уровень шума не хуже 200 мкВ. Двухканальная система регистрации дефектоскопа АДНШ/АДНКТ отстраивается от плавающего акустического контакта ПЭП с торцом объекта контроля, используя в качестве величины сигнала от дефекта (звено 1) амплитуду сигнала, приведенную к амплитуде первого донного импульса (звено 0), принятого за 100 %.

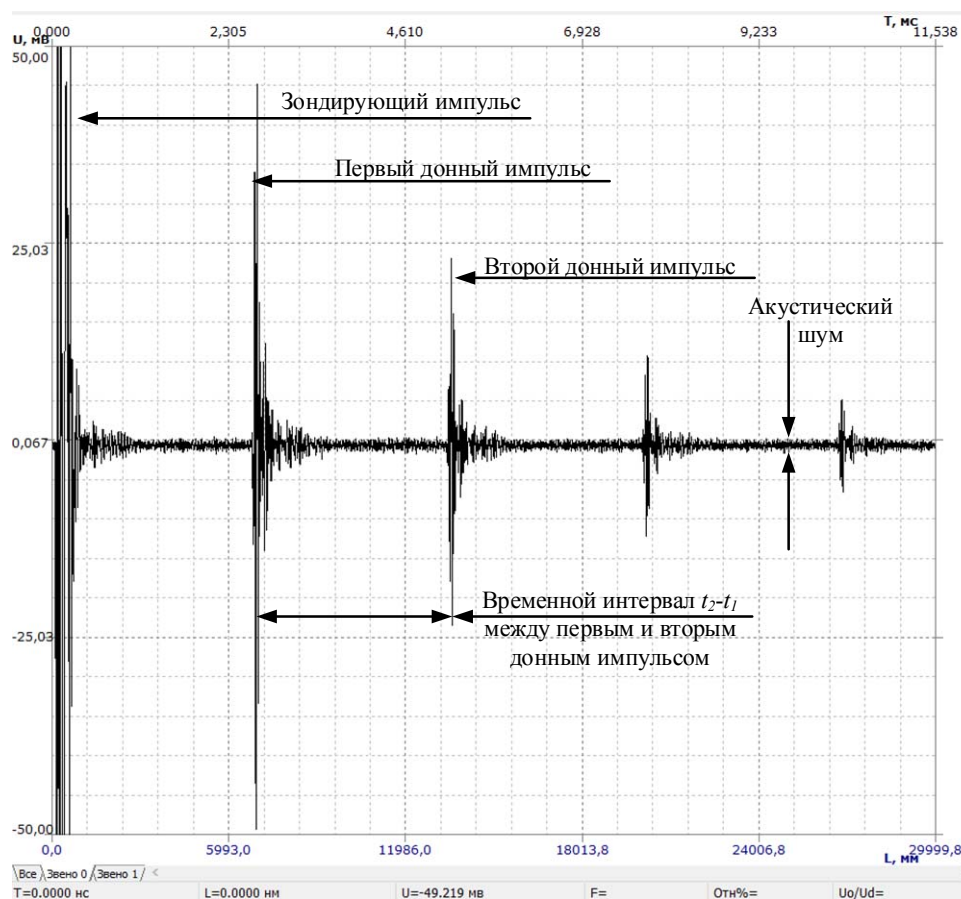


Рис. 2. Эхограмма прутка композитной арматуры при прозвучивании стержневой волной

Fig. 2. Echogram of the rod of composite reinforcement when sounding a rod wave

Возбуждение акустической волны с торца вызывает прохождение стержневой волны по телу прутка АКП, отражение его от дефектов и противоположного торца с последующей регистрацией импульсов тем же датчиком на торце. Процесс продолжается до полного затухания импульса. Сигнал, полученный на прутке АКП, длиной 6 м, приведен на рис. 2. Эхограмма получена в программной среде «монитор» дефектоскопа АДНШ с частотой дискретизации 10 МГц. На эхограмме можно выделить: зондирующий импульс, 1-й донный импульс, 2-й донный импульс, акустический шум. При опре-

деления скорости используется временной интервал между 1-м и 2-м донными импульсами.

На основании величины временного интервала и фактической длины стержня АКП рассчитывается скорость ультразвуковой волны по формуле (3) исходя из того, что сигнал излучается и принимается одним и тем же ПЭП, т. е. проходит удвоенный путь по телу прутка:

$$C = 2L / (t_2 - t_1), \quad (3)$$

где  $C$  – скорость ультразвука в объекте контроля;  $L$  – длина объекта контроля;  $t_1$  – время при-

хода первого донного импульса;  $t_2$  – время прихода второго донного импульса.

### Объекты контроля

Опробование методики контроля протяженных объектов произведено на образцах АКП с условным диаметром  $\varnothing 8$  мм (ГОСТ 31938–2012), представленных 5 партиями четырех производителей. Группы прутков, на которых

проводились эксперименты, приведены в табл. 1. Уменьшение количества проконтролированных прутков по сравнению с общим количеством прутков в партии № 1 вызвано тем, что их диаметр выше заявленного по ГОСТу (производственный брак), что не позволило установить датчик. Доля прутков производителя № 1, не прошедших контроль, составила 20 %.

Таблица 1. Прутки арматуры композитной полимерной

Параметр	Все прутки	Партии прутков арматуры композитной полимерной				
		1	2	3	4	5
Количество прутков в партии, шт.	1198	300	298	300	150	150
Проконтролировано, шт.	1102	238	269	296	150	149
Акустический шум, %	1,1	1,6	1,4	1,1	1,6	2,0
Количество прутков с локальными особенностями выше 2 %, шт.	39	15	4	18	0	2
Доля прутков с локальными особенностями, %	3,5	6,3	1,5	6,1	0,0	1,3

Партия № 1 (рис. 3, а) и № 3 (рис. 3, в) представлены арматурой с однозаходной нитью. Партия № 2 (рис. 3, б), № 4 и 5 (рис. 3, г) представлены арматурой с двузаходной нитью.



Рис. 3. Внешний вид прутка композитной арматуры с условным диаметром  $\varnothing 8$  мм: а – партия № 1; б – партия № 2; в – партия № 3; г – партия № 4, 5

Fig. 3. Appearance of the bar of composite reinforcement with the conditional diameter  $\varnothing 8$  mm: а - party number 1; б - party number 2; в - party number 3; г - party number 4, 5

Прутки партии № 4 и 5 произведены одним производителем (ООО «КомАР»), имеют черный цвет и позиционируются на рынке в разных ценовых категориях. Производителем установлено качество АКП в партии № 4 выше, чем партии № 5.

Все прутки подвергнуты предварительному исследованию датчиком стержневой волны в виде акустического прозвучивания с одной стороны прутка. Результаты предварительного исследования прутков представлены в табл. 1. В качестве параметра, характеризующего наличие неоднородности в прутке, использован ко-

эффициент отражения  $A$  в виде отношения пикового значения акустического шума на участке от 3,5 до 6 м, приведенное к амплитуде 1-го донного импульса и выраженное в процентах:

$$A = U_d / U_{дон} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где  $U_{дон}$  – пиковая амплитуда первого донного импульса;  $U_d$  – пиковая амплитуда импульса от дефекта.

На анализируемом участке присутствует акустический шум, не превышающий уровня 2 %. Все особенности, обнаруженные на эхограмме на заданном участке, имеют, как правило, локальный характер. Все прутки подвергнуты визуальному контролю. При последующем визуальном осмотре прутков по координатам выявленных особенностей обнаружены дефекты тела АКП с протяженностью 10-30 мм. Выбракované прутки были подвергнуты повторному многократному прозвучиванию с целью последующего подтверждения обнаруженных дефектов.

### Результаты и обсуждение

На диаграмме (рис. 4) показано распределение амплитуд сигналов от участков с локальными акустическими неоднородностями в образцах по партиям. По оси абсцисс отложен номер партии, по оси ординат – процент от общего количества образцов в партии. Левый столбец диаграммы показывает долю прутков с амплитудой сигнала от неоднородности выше 2 %. В нее также входят образцы с амплитудой сигнала от неоднородности выше уровня 5 и 10 %.

Таким образом, наибольшее количество образцов с акустическими неоднородностями об-

наружено в партии № 1 и 3. Выбор уровня 2 % обусловлен средним значением уровня шума по всем партиям.

Примеры обнаруженных и визуально выявленных дефектов и соответствующие им дефектограммы приведены на рис. 5.

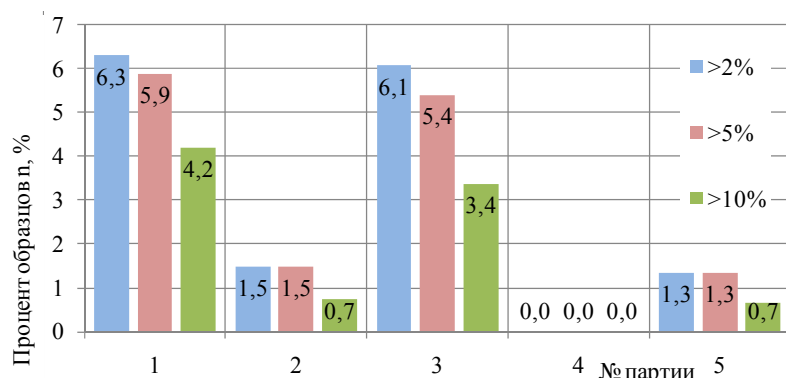


Рис. 4. Распределение амплитуд сигналов от дефектных участков в образцах по партиям

Fig. 4. Distribution of amplitudes of signals from defective parts in samples in batches

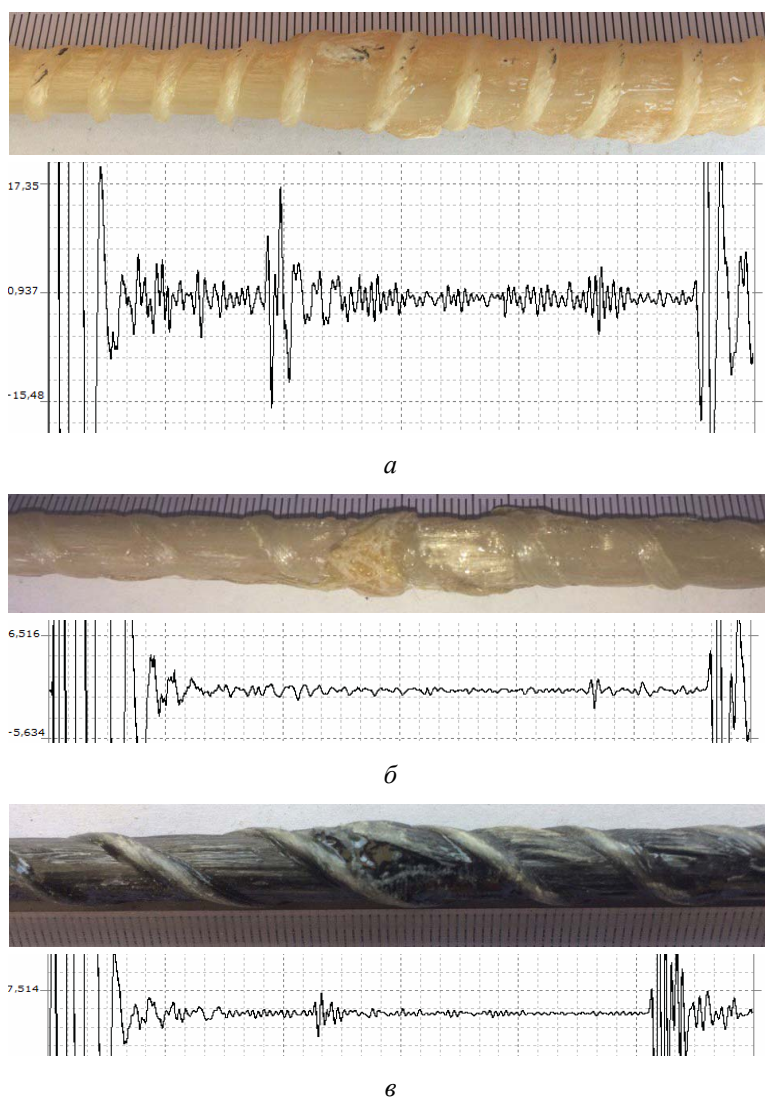
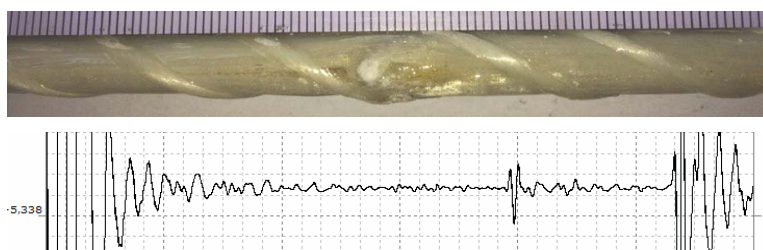


Рис. 5. Внешний вид прутков композитной арматуры в зоне дефекта и соответствующая эхограмма: а – партия № 1; б – партия № 2; в – партия № 3

Рис. 5. Appearance of bars of composite reinforcement in the zone of the defect and corresponding echogram: а - party number 1; б - party number 2; в - party number 3



2

Рис. 5 (окончание):  $z$  – партия № 4, 5

Fig. 5 (continued):  $z$  - party number 4, 5

В соответствии с формулой (2) при проведении дефектоскопии с использованием стержневых волн амплитуда эхосигналов от локальных неоднородностей  $R_d$  зависит от отношения площадей сечения в зоне дефекта и в бездефектной области. В табл. 2 представлены характеристики изменения площади сечения в зоне локального дефекта и соответствующие им значения амплитуд импульсов на эхограмме.

Таблица 2. Значение коэффициента отражения и изменение площади сечения в зоне обнаруженного дефекта

Table 2. The value of the reflection coefficient and the change in area section in the zone of detected defect

№ образца	Изменение площади сечения $R_d$ , %	Коэффициент отражения $A$ , %	Характер дефекта
1-003	0,04	7,2	наплыв
1-013	0,12	12,5	отслоение нитей
1-059	0,19	14,5	наплыв
1-148	0,01	4,9	узел
1-151	0,23	17,0	наплыв на узле
1-260	0,16	12,8	наплыв
1-263	0,05	11,3	узел
2-219	0,11	10,6	разрыв
2-254	0,04	7,1	наплыв
3-045	0,11	11,4	наплыв
3-047	0,26	20,7	утолщение
3-072	0,06	10,0	узел
3-089	0,05	5,9	узел
4-201	0,02	9,9	разрыв
4-300	0,04	12,4	разрыв
1-280	0,06	17,3	наплыв на узле
3-273	0,10	21,8	наплыв
3-249	0,01	12,8	утолщение
3-274	0,00	17,5	внутренний

Дефекты промоделированы в среде твердотельного моделирования «Компас 3D». Значение коэффициента  $R_d$  принято по модулю. Обнаруженные дефекты в силу отсутствия устоявшейся классификации дефектов АКП разделены по ха-

рактерному внешнему виду. Дефекты типа узел составили 22 %, дефекты типа наплыв – 44 %, дефекты типа разрыв – 22 %, дефекты типа утолщение – 6%, дефекты типа отслоение нитей – 6 %. Основной причиной возникновения дефектов в теле АКП является несовершенство технологического процесса производства, при котором в случае обрыва нити армирующего наполнителя производится остановка оборудования и нити соединяются узлом. Данный метод восстановления нити армирующего наполнителя приводит к нарушению параллельности нитей, образуется наплыв из связующего материала, а иногда к возникновению внутренних полостей, не заполненных наполнителем. К таким дефектам можно отнести обнаруженные дефекты типа узел, наплыв, утолщение, отслоение нитей. Образец 3-274 при отсутствии значительных изменений сечения ( $R_d < 0,1$ ) классифицирован как образец с внутренним дефектом. При визуальном осмотре образца 3-274 обнаружены нити навивки, не заполненные наполнителем, что при сохранении внешнего контура стержня (сечения) приводит к потере массы в зоне дефекта, но не отражается при расчете изменения площади сечения.

Амплитуды сигналов от дефектов при различных коэффициентах изменения площади сечения  $R_d$  представлены графически на рис. 6. Отдельной группой отмечены образцы, имеющие значительный эхосигнал от дефекта при визуальном малом или незначительном изменении площади сечения: 1-280, 3-273, 3-249, 3-274. Дефекты в этих образцах при наличии существенных внутренних неоднородностей не имеют значительных внешних проявлений и, как следствие, не будут устойчиво отбраковываться при визуальном осмотре.

В силу трудностей точного измерения размера дефектов и отсутствия учета протяженности дефекта по телу АКП соотношение между измеренным значением площади сечения дефекта и полученным значением эхоимпульса имеет

существенный разброс. Тем не менее отчетливо прослеживается зависимость величины сигнала от размера неоднородности в теле прутка. Метод одинаково чувствителен как к поверхностным, так и к внутренним дефектам.

Производительность метода в основном определяется временем измерения – 15 с – и временем установки датчика на объект контроля, что позволяет проводить сплошной контроль прутков АКП длиной 12 м с усредненной скоростью 33 м/с.

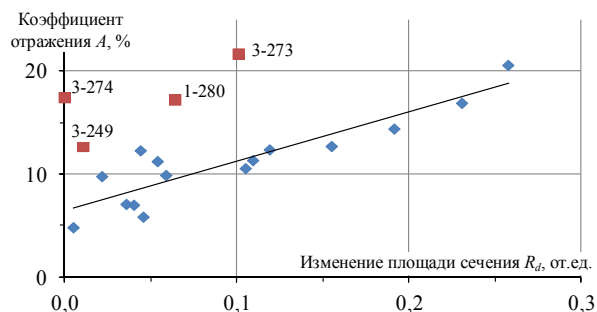


Рис. 6. Амплитуды сигналов от дефектов с различными коэффициентами изменения площади сечения  $R_d$

Fig. 6. Amplitude of signals from defects with different coefficients of change in the area of section  $R_d$

### Заключение

1. Особенности материала и формы сечения композитной арматуры накладывают существенные ограничения на выбор метода поиска дефектов. Экспериментальные исследования показывают, что волноводная методика контроля протяженных объектов может быть успешно использована для поиска дефектов в арматуре композитной полимерной.

2. На основании измерений более 1100 прутков АКП в 5 партиях от четырех производителей по параметру «амплитуда эхосигнала от дефекта, приведенная к амплитуде 1-го донного импульса» найдены и визуально подтверждены дефектные участки, имеющие значительные отклонения от сечения прутка. Принятый уровень поиска дефектов – 2 % от амплитуды первого донного импульса – позволяет устойчиво выявлять дефекты в АКП. В 5 партиях прутков четырех производителей общим числом 1102 шт. количество прутков с дефектами составило 39 шт. (3,5 %).

3. На основании моделирования изменения площади сечения в зоне обнаруженных дефектов рассчитан коэффициент отражения от естественных дефектов: раковины глубиной более 0,5 мм; вмятины от механического воздействия

с повреждением волокон; наплывы связующего высотой более 2,0 мм; участки волоконного наполнителя в силовом стержне и анкерочном слое не пропитаны связующим и ослабляют поперечное сечение прутка. Метод показывает высокую эффективность контроля при выявлении дефектов вне зависимости от их расположения по сечению стержня. Метод контроля обладает высокой производительностью. Одна установка контроля позволяет проводить сплошной контроль прутков АКП длиной 12 м с приведенной скоростью 33 м/с.

### Библиографические ссылки

1. Трифонова С. И., Генералов А. С., Далин М. А. Современные технологии и средства теневого ультразвукового контроля полимерных композиционных материалов // Технология машиностроения. 2017. № 7. С. 37–43.
2. Ehrhart B., Valeske B., Bockenheimer C. Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites. Springer, Cham, 2013, pp. 220-237.
3. Katunin A., Dragan K., Dziendzikowski M. Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques. *Composite Structures*, 1 June 2015, pp. 1-9.
4. Zheng K., Chang Y.S., Wang K.H., Yao Y. Improved non-destructive testing of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites using pulsed thermograph. *Polymer Testing*, 2015, vol. 46, pp. 26-32.
5. Farhana N.I.E., Abdul Majida M.S., Paulraja M.P., Ahmadhilmib E., Fakhzana M.N., Gibson A.G. A novel vibration based non-destructive testing for predicting glass fibre/matrix volume fraction in composites using a neural network model. *Composite Structures*, 1 June 2016, vol. 144m, pp. 96-107.
6. Segreto T., Bottillo A., Teti R. Advance ultrasonic non-destructive evaluation for metrological analysis and quality assessment of impact damaged non-crimp fabric composites. *Proc. 48th CIRP Conference of Manufacturing Systems*, 2016, pp. 1055-1060.
7. Sarasini F., Santulli C. Non-destructive testing (NDT) of natural fibre composites: acoustic emission technique. Ch. 10, *Natural Fibre Composites*, 2014, pp. 273-302.
8. Потапов А. И., Махов В. Е. Методы неразрушающего контроля и диагностики прочности изделий из полимерных композиционных материалов // Дефектоскопия. 2018. № 3. С. 7–19.
9. Потапов А. И., Махов В. Е. Физические основы контроля упругих характеристик анизотропных композиционных материалов ультразвуковым методом // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 33–49.
10. Rique A.M., Machado A.C., Oliveira D.F., Lopes R.T., Lima I. X-ray imaging inspection of fiberglass reinforced by epoxy composite. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 349, pp. 184-191.



11. Atas A., Soutis C. Subcritical damage mechanisms of bolted joints in CFRP composite laminates. *Composites, Part B: Engineering*, 2013, 54, pp. 20-27.

12. Hung Y.Y., Yang L.X., Huang Y.H. Non-destructive evaluation (NDE) of composites: digital shearography. Ch. 5, *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*, 2013, pp. 84-115.

13. Gholizadeh S. A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Proc. XV Portuguese Conference on Fracture*, 2016, pp. 50-57

14. Муравьева О. В., Злобин Д. В. Акустический тракт метода многократных отражений при дефектоскопии линейно-протяженных объектов // Дефектоскопия. 2013. № 2. С. 43–51.

15. Муравьева О. В., Леньков С. В., Мышкин Ю. В. Факторы, влияющие на ослабление крутильных волн в трубах в условиях нагружения на контактные вязкоупругие среды // Дефектоскопия. 2016. № 9. С. 3–10.

16. Муравьева О. В., Леньков С. В., Мурашов С. А. Крутильные волны, возбуждаемые электромагнитно-акустическими преобразователями, при акустическом волноводном контроле трубопроводов // Акустический журнал. 2016. № 1. С. 117–124.

17. Анализ сравнительной достоверности акустических методов контроля пруткового проката из рессорно-пружинных сталей / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Е. Н. Фокеева // Дефектоскопия. 2014. № 8. С. 43–51.

18. Факторы, влияющие на эффективность возбуждения крутильных волн при волноводном контроле труб / О. В. Муравьева, С. В. Леньков, В. В. Муравьев, Ю. В. Мышкин, С. А. Мурашов // Дефектоскопия. 2016. № 2. С. 33–41.

19. Myshkin Yu.V. Muraveva O.V. The features of the guided wave excitation and propagation at testing of pipes IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publ., 2017, vol. 881, Conference 1-C, 012019 International Conference on Innovations in Non-Destructive Testing (SibTest), 2017, doi :10.1088/1742-6596/881/1/012019. Russian Federation, Novosibirsk, 27-30 June 2017.

20. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. 234 с.

21. Технология акустического волноводного контроля насосно-компрессорных труб / О. В. Муравьева, В. А., Стрижак Д. В. Злобин, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 4. С. 51–56.

22. Муравьева О. В., Стрижак В. А., Злобин Д. В. Акустический волноводный контроль элементов глубиннонасосного оборудования // Нефтяное хозяйство. 2016. № 9. С. 110–115.

23. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, А. Б. Ефремов // Известия вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 6. С. 565–571.

24. Муравьев В. В., Стрижак В. А., Хасанов Р. Р. Особенности программного обеспечения аппаратного комплекса для акустической тензометрии и структуроскопии металлоизделий // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 2 (29). С. 71–75.

25. Стрижак В. А., Хасанов Р. Р., Пряхин А. В. Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 2. С. 159–166.

## References

1. Trifonova S.I., Generalov A.S., Dalin M.A. [Actual Technologies and Instruments for Polymer Composite Materials Testing with Through Transmission Ultrasonic Technique]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 31-35 (in Russ.).

2. Ehrhart B., Valeske B., Bockenheimer C. Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites. Springer, Cham, 2013, pp. 220-237.

3. Katunin A., Dragan K., Dziendzikowski M. Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques. *Composite Structures*, 1 June 2015, pp. 1-9.

4. Zheng K., Chang Y.S., Wang K.H., Yao Y. Improved non-destructive testing of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites using pulsed thermograph. *Polymer Testing*, 2015, vol. 46, pp. 26-32.

5. Farhana N.I.E., Abdul Majida M.S., Paulraja M.P., Ahmadiyah E., Fakhzana M.N., Gibson A.G. A novel vibration based non-destructive testing for predicting glass fibre/matrix volume fraction in composites using a neural network model. *Composite Structures*, 1 June 2016, vol. 144m, pp. 96-107.

6. Segreto T., Bottillo A., Teti R. Advance ultrasonic non-destructive evaluation for metrological analysis and quality assessment of impact damaged non-crimp fabric composites. *Proc. 48th CIRP Conference of Manufacturing Systems*, 2016, pp. 1055-1060

7. Sarasini F., Santulli C. Non-destructive testing (NDT) of natural fibre composites: acoustic emission technique. Ch. 10, *Natural Fibre Composites*, 2014, pp. 273-302.

8. Potapov A.I., Makhov V.E. [Methods for Nondestructive Testing and Diagnostics of Durability of Articles Made of Polymer Composite Materials]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 151-163.

9. Potapov A.I., Makhov V.E. [Physical basics of evaluating elastic characteristics of anisotropic composites by ultrasonic method]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, no. 11, pp. 785-799.

10. Rique A.M., Machado A.C., Oliveira D.F., Lopes R.T., Lima I. X-ray imaging inspection of fiberglass reinforced by epoxy composite. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 349, pp. 184-191.

11. Atas A., Soutis C. Subcritical damage mechanisms of bolted joints in CFRP composite laminates. *Composites, Part B: Engineering*, 2013, 54, pp. 20-27.

12. Hung Y.Y., Yang L.X., Huang Y.H. Non-destructive evaluation (NDE) of composites: digital shearography. Ch. 5, *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*, 2013, pp. 84-115.
13. Gholizadeh S. A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Proc. XV Portuguese Conference on Fracture*, 2016, pp. 50-57
14. Murav'eva O.V., Zlobin D.V. [The acoustic path in the method of multiple reflections during nondestructive testing of linearly extended objects]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2013, vol. 49, no. 2, pp. 93-99.
15. Murav'eva O.V., Myshkin Y.V., Len'kov S.V. [Factors affecting attenuation of torsional waves in pipes loaded on contact viscoelastic media]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 9, pp. 485-491.
16. Murav'eva O.V., Len'kov S.V., Murashov S.A. [Torsional waves excited by electromagnetic acoustic transducers during guided-wave acoustic inspection of pipelines. *Acoustical Physics*, 2016, no. 1, pp. 117-124 (in Russ.). DOI 10.7868/S032079191506009X.
17. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Strizhak V.A. [An analysis of the comparative reliability of acoustic testing methods of bar stock from spring steels]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, no. 8, pp. 435-442.
18. Murav'eva O.V., Len'kov S.V., Murav'ev V.V. [Factors that affect the excitation effectiveness of torsional waves during waveguide inspection of pipes]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, no. 2, pp. 33-41 (in Russ.).
19. Myshkin Yu.V. Muraveva O.V. The features of the guided wave excitation and propagation at testing of pipes IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publ., 2017, vol. 881, Conference 1-C, 012019 International Conference on Innovations in Non-Destructive Testing (SibTest), 2017, doi :10.1088/1742-6596/881/1/012019. Russian Federation, Novosibirsk, 27-30 June 2017.
20. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Strizhak V.A. *Akusticheskii volnovodnyi kontrol' lineino-protyazhennykh ob'ektov. Novosibirsk* [Acoustic waveguide control of linearly extended objects]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2017, 234 p. (in Russ.).
21. Murav'eva O.V., Strizhak V.A., Zlobin D.V., Murashov S.A., Pryakhin A.V. [Acoustic Waveguide Control Technology for Tubing]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2014, no. 4, pp. 51-56 (in Russ.).
22. Murav'eva O.V., Strizhak V.A., Zlobin D.V., Murashov S.A., Pryakhin A.V. [Technology of acoustic waveguide control of tubing]. *Neftyanoe khozyaistvo*, 2016, № 9, pp. 110-115 (in Russ.).
23. Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Khasanov R.R., Efremov A.B. [Hardware-software complex for rods control by mirror-shadow method using multiple reflections]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 565-571 (in Russ.). DOI 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571.
24. Muraviev V.V., Strizhak V.A., Khasanov R.R. [Features of the software for the hardware-based system of acoustic tensometry and structural inspection of metal products]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2016, no. 2, pp. 71-75 (in Russ.).
25. Strizhak V.A., Khasanov R.R., Pryakhin A.V. [Features of Excitation of an Electromagnetic Acoustic Transducer under a Waveguide Method of Testing]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 159-166 (in Russ.). DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166.

### Flaw Detection of Composite Rebar by Acoustic Wave Guided Technique

V.A. Strizhak, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A.V. Pryakhin, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

R.R. Khasanov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

S.S. Mkrtchyan, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*The widespread implementation of composite polymer rebars is interfered by the lack of productive methods for its flaw detection. The characteristics of the material and the cross-sectional shape of composite rebars impose significant restrictions on the choice of the flaw detection technique. The proposed waveguide technique for non-destructive testing of extended objects is free from the drawbacks of other methods.*

*A description of the measuring system that implements the waveguide control technique of composite rebars is presented. The technique was tested on a batch of composite rebars with a nominal diameter of 8 mm and a volume of more than 1,100 pieces differentiated by four manufacturers. The amplitude of the echo signal from the flaw, scaled to the amplitude of the first bottom impulse, is used as the measurable parameter. Exposed flaws and corresponding echograms are shown. A rejection level of 2% was determined, which allowed for finding and visually confirming defective areas that have significant deviations of the cross-section area.*

*Based on the simulation of the cross-sectional area change in the zone of detected flaws, the reflection coefficient was calculated. Comparison of the calculated reflection coefficient with the signal from the flaw shows the high efficiency of the NDT technique in detecting defects, regardless of their location over the cross section of the bar. The capacity of one unit for continuous testing of bars with a length of 12 m is 33 m/s.*

**Keywords:** acoustic testing, waveguide technique, flaw detection, composite rebars, echogram.

Получено 23.01.2019

**Образец цитирования**

Дефектоскопия композитной арматуры акустическим волноводным методом / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, С. С. Мкртчян // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 1. С. 78–88. DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-78-88.

**For Citation**

Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Khasanov R.R., Mkrтчyan S.S. [Flaw detection of composite rebarby acoustic waveguided technique]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 78-88 (in Russ.). DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-78-88.